

УДК 621.371.3

А. Д. Григорьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)В. В. Мещеряков, С. Н. Семенов
ООО "Apstec Labs" (Санкт-Петербург)

Исследование эффекта изменения поляризации микроволнового излучения скрытыми объектами на теле человека

Рассмотрена возможность идентификации скрытых металлических объектов на теле человека по изменению плоскости поляризации микроволнового излучения, отраженного от ребер и вершин объекта. Сформулировано матричное уравнение для амплитуд основной и кроссполяризации. Приведены результаты измерений на специальной установке. Показано, что амплитуда кроссполяризации отраженного сигнала может служить для индикации скрытых металлических объектов.

Микроволны, деполяризационный эффект, досмотровые системы

В современном мире проблемам безопасности людей и технических объектов уделяется все большее внимание. В связи с этим были разработаны и успешно эксплуатируются различные досмотровые системы (ДС), позволяющие обнаруживать скрытые опасные объекты. К сожалению, большинство этих ДС не имеет возможности осуществлять дистанционный скрытый досмотр, позволяющий заблаговременно обнаружить и локализовать опасный объект на теле человека или в его багаже. Поэтому разрабатываются новые методы обнаружения опасных объектов на теле человека.

Одним из перспективных направлений таких разработок являются многопозиционные микроволновые досмотровые системы (ММДС), формирующие изображение объекта с помощью волновых электромагнитных полей [1]. Такие системы состоят из приемного модуля 1 и решетки передающих модулей 2 (рис. 1)¹. Предназначенные для поиска взрывчатых веществ, они не могут уверенно обнаруживать скрытые металлические объекты на теле человека, поскольку в микроволновом диапазоне отражающая способность его тела близка к отражающей способности металла. Это приводит к сильной зависимости вероятности обнаружения от формы объекта, его положения и разрешающей способности ММДС.

Один из путей решения указанной проблемы состоит в использовании эффекта деполяризации –

изменения поляризации электромагнитной волны, рассеянной острыми ребрами и вершинами металлического предмета. Регистрируя эти изменения, можно существенно повышать вероятность обнаружения скрытых металлических объектов на теле человека [2]. Однако для создания эффективных алгоритмов обнаружения требуется определить величину данного эффекта в различных условиях. Эта задача является первостепенной для дальнейшего усовершенствования ММДС.

Различные модели теории рассеяния для исследования поляризационной структуры отраженного излучения описаны в [3], [4]. Так, в методе краевых волн [3] рассматривается модель, пред-

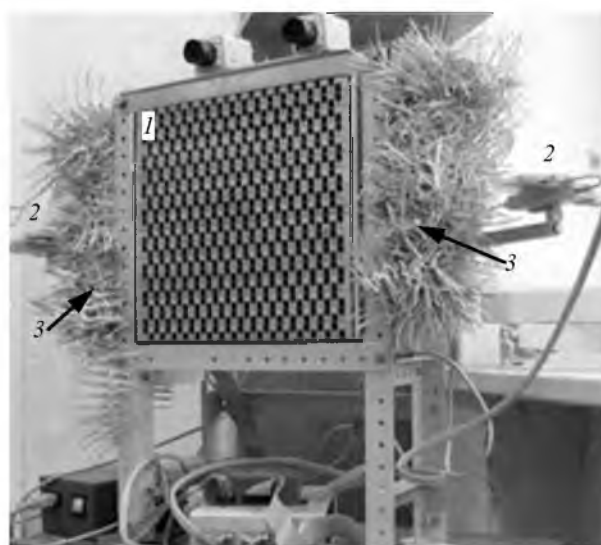


Рис. 1

¹ Ленточный материал по бокам решетки предназначен для уменьшения уровня прямой засветки двух боковых приемников 3.

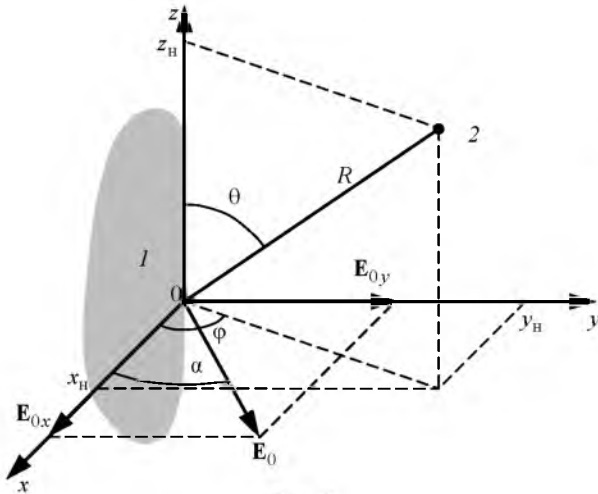


Рис. 2

ставленная на рис. 2, где 1 – облучаемый объект, 2 – точка наблюдения; R , θ , φ – сферические координаты точки наблюдения; $x_H = R \sin \theta \cos \varphi$; $y_H = R \sin \theta \sin \varphi$; $z_H = R \cos \theta$ – прямоугольные координаты этой точки, причем начало системы координат лежит вблизи тела и $R \gg a$ (a – характерный размер отражающего тела). Модель описывается следующими выражениями для электрического поля отраженной волны в дальней зоне:

$$\begin{cases} E_\varphi = (ia/2) [E_{0x} \bar{\Sigma}_1(\gamma, \theta, \varphi) + E_{0y} \Sigma_1(\gamma, \theta, \varphi)] (e^{-ikR}/R); \\ E_\theta = (ia/2) [E_{0x} \bar{\Sigma}_2(\gamma, \theta, \varphi) + E_{0y} \Sigma_2(\gamma, \theta, \varphi)] (e^{-ikR}/R), \end{cases} \quad (1)$$

где E_φ , E_θ – проекции напряженности электрического поля рассеянной телом волны; $E_{0x} = E_0 \cos \alpha$ и $E_{0y} = E_0 \sin \alpha$ – проекции вектора \mathbf{E}_0 падающей волны, лежащие в плоскости xOy ; $\bar{\Sigma}_{1,2}(\gamma, \theta, \varphi)$ и $\Sigma_{1,2}(\gamma, \theta, \varphi)$ – неизвестные угловые функции; $\gamma = \pi - \theta$ – угол между нормалью к фронту волны и осью z .

Аналитическое решение дифракционной задачи для объектов сложной формы невозможно, поэтому для решения поставленной задачи целесообразно использовать программные пакеты электромагнитного моделирования [2]. Результаты, полученные при моделировании, требуют экспериментального подтверждения.

Для выполнения подтверждающего эксперимента была собрана измерительная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 3. Установка состоит из векторного анализатора цепей Agilent 5230с, антенны на поворотном

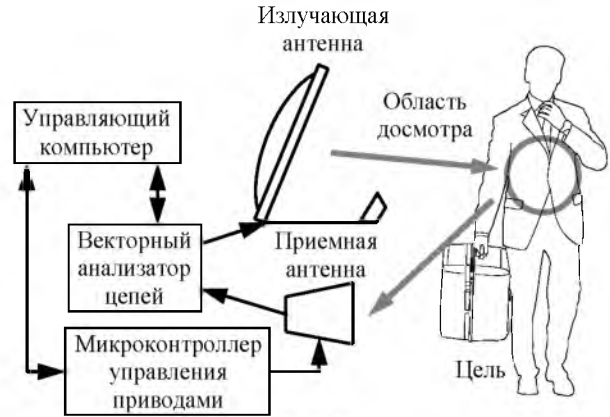


Рис. 3

стенде (рис. 4), фокусирующей излучение в область досмотра, приемной антенны с необходимыми приводами вращения, микроконтроллеров управления с блоками питания и персонального компьютера. Для минимизации влияния внешних факторов на эксперимент стены помещения и элементы конструкции закрыты материалом, поглощающим электромагнитное излучение.

Измерения проводились в диапазоне частот 8...12 ГГц, цель облучалась линейно-поляризованной волной, а прием сигнала осуществлялся в двух ортогональных поляризациях. Для излучающей антенны измерялось распределение поля в двух ортогональных поляризациях на плоскости, перпендикулярной оптической оси и находящейся в месте расположения предполагаемой цели. Система линейных перемещений обеспечивала измерения в области с размерами $20 \times 20 \text{ см}^2$ с шагом в 2 см.

На рис. 5 показаны изолинии мощности рас-

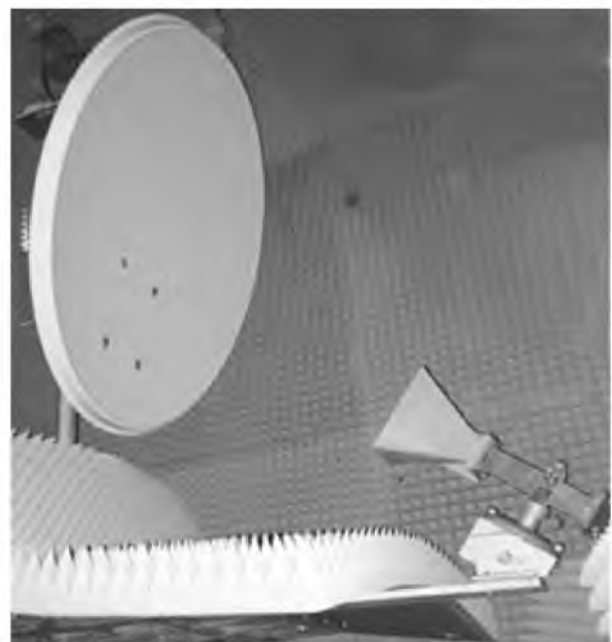


Рис. 4

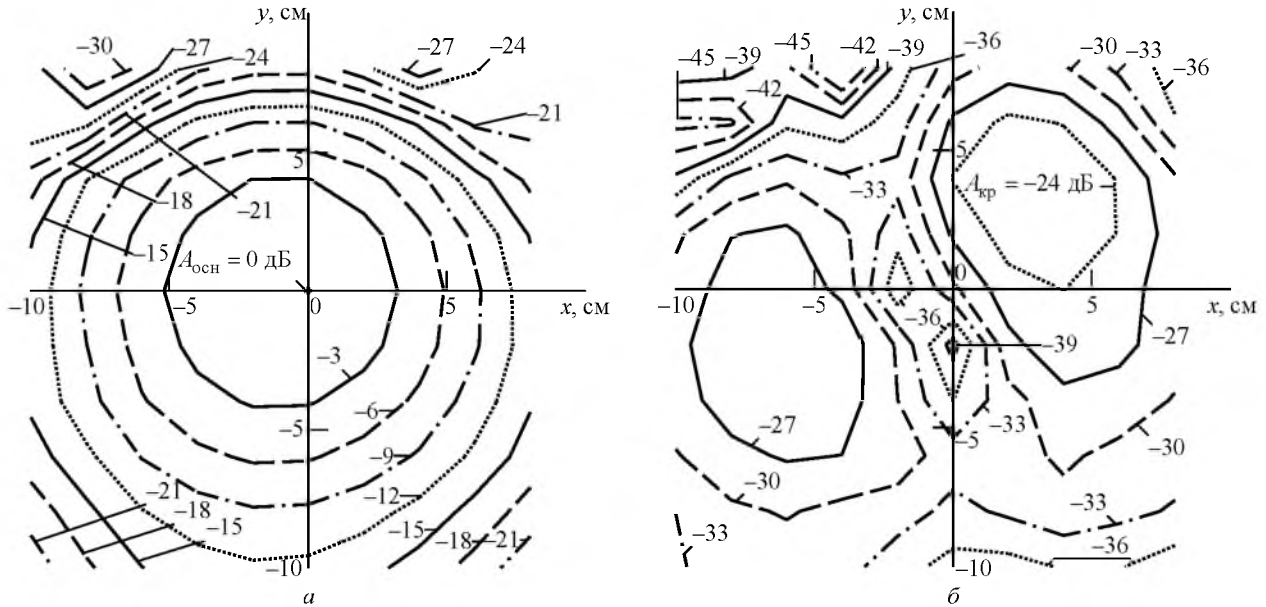


Рис. 5

сеянного сигнала на центральной частоте рабочего диапазона, полученные по результатам измерений. За нулевой уровень (0 дБ) принято значение максимальной мощности основной поляризации. Как видно, размеры фокального пятна по уровню -3 дБ не превышают 10 см, что соответствует значению этого параметра для ММДС. Кроссполаризационная развязка (отношение амплитуд поля кроссполаризации и основной поляризации) в пятне составляет не менее 25 дБ.

Используя обратное преобразование Фурье и допустив совмещенное расположение приемной и передающей антенн (рис. 6), как в задаче, рассмотренной в [6], исследовали зарегистрированный сигнал во временной области [5], приняв для него выражение

$$S(t) = \mathfrak{Z}^{-1} [C(\nu) \Gamma(\nu) e^{-i(4\pi\nu/c)z_0}], \quad (2)$$

где \mathfrak{Z}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье; $C(\nu)$ – частотно-зависимый отклик при-

емной и передающей антенн; $\Gamma(\nu)$ – коэффициент отражения от цели; ν – частота; c – скорость света в вакууме; z_0 – расстояние до цели вдоль оптической оси излучающей антенны.

Для сравнения теоретических и экспериментальных данных использовался образец из воска на теле человека. В этом случае при нормальном падении волны

$$\Gamma(\nu) = \frac{\Gamma_{\text{wax}} + \Gamma_{\text{body}} e^{i2kh}}{1 + \Gamma_{\text{wax}} \Gamma_{\text{body}} e^{i2kh}}, \quad (3)$$

где

$$\Gamma_{\text{wax}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{\text{wax}}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{\text{wax}}}}; \quad \Gamma_{\text{body}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{wax}}} - \sqrt{\epsilon_{\text{body}}}}{\sqrt{\epsilon_{\text{wax}}} + \sqrt{\epsilon_{\text{body}}}};$$

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{wax}}};$$

h – толщина образца, причем ϵ_{wax} и ϵ_{body} – комплексные относительные диэлектрические проницаемости воска и тела человека соответственно. Ветви комплексных корней фиксированы так, что их мнимые части положительны.

Для вычисления пространственного распределения амплитуды отраженной волны написана специальная программа на MATLAB, учитывающая связь между временем и оптическим путем в вакууме $z = ct/2$, а также ограничением разрешения по дальности для измерительной системы:

$$\Delta z \geq \frac{c}{2\sqrt{\epsilon} \cdot \Delta \nu}, \quad (4)$$

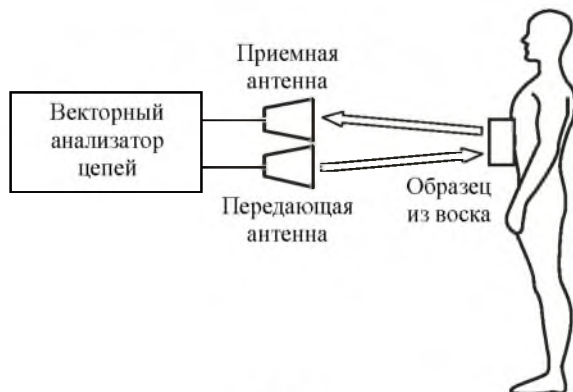


Рис. 6

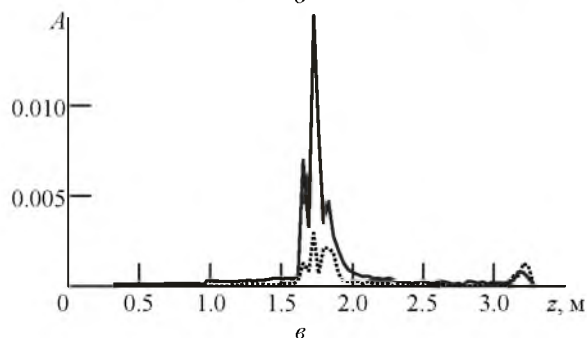
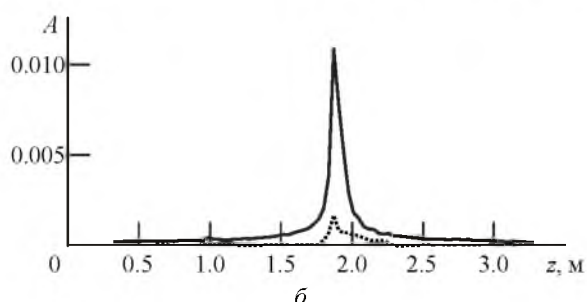
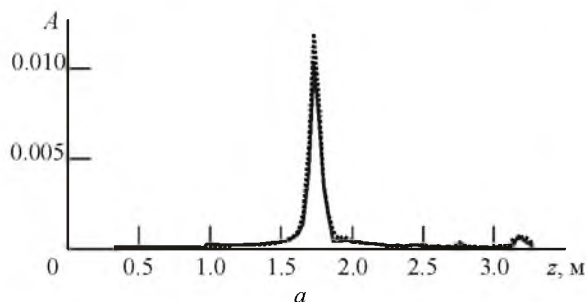
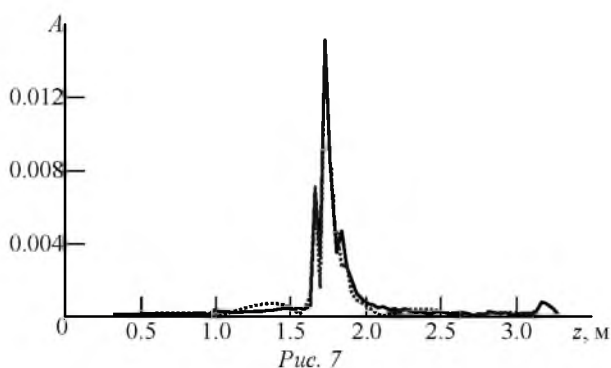


Рис. 8

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; $\Delta\nu$ – ширина полосы частот измерительной системы.

Амплитуда и фаза рассеянного поля регистрировались с помощью векторного анализатора в полосе частот 8...12 ГГц в 1024 точках на расстоянии 0.7 м от тела как параметр S_{21} . Далее результаты измерения обрабатывались по (2) и (4). Затем, после перехода от переменной времени к пространственной координате вдоль направления распространения волны, формировалась зависимость распределения амплитуды фурье-образа для блока воска толщиной 5 см на теле человека (рис. 7, сплошная линия).

На этом же рисунке нанесены теоретические данные, рассчитанные по (2), (3) для $\varepsilon_{\text{wax}} = 2.2$ и $\varepsilon_{\text{body}} \approx 28.7 + 8.23i$ (пунктирная линия).

Запишем выражение (1) для ортогональных проекций вектора \mathbf{E} рассеянной волны в прямоугольной системе координат для случая облучения объекта линейно-поляризованной волной с горизонтально ориентированной плоскостью поляризации ($E_{0y} = 0$; $E_{0x} = E_{0h}$). Введем квадратную матрицу рассеяния S [7], описывающую поляризационную структуру отклика исследуемого объекта:

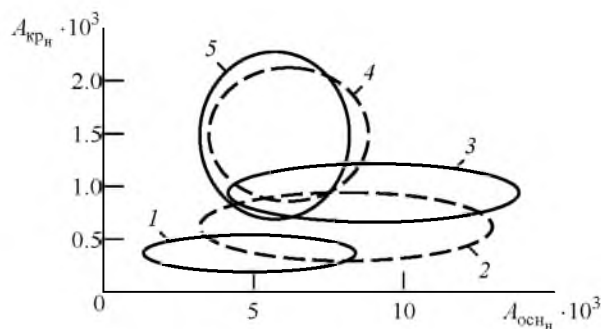
$$\begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} = \frac{e^{-ikR}}{2\sqrt{\pi}R} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0h} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Информация об эффекте изменения поляризации микроволнового излучения скрытыми объектами на теле человека содержится в элементах S_{hh} и S_{vh} матрицы рассеяния.

Исследование проводилось на группе людей в повседневной одежде, поочередно располагавшихся на произвольном расстоянии 1.5...2 м с образцами и без них.

На рис. 8 представлены результаты расчета амплитуды фурье-образа (2) вдоль оптической оси излучающей антенны для основной поляризации (сплошные линии) и кроссполяризации (пунктирные линии) по измеренным данным для различных образцов на теле человека: *а* – образец с металлическими поражающими элементами; *б* – отсутствие образца; *в* – образец из диэлектрика². Как видно на рис. 8, *а*, значение максимума амплитуды в кроссполяризации для образца с большим количеством металлических элементов на теле человека значительно превосходит максимальные значения в остальных случаях.

На рис. 9 представлены результаты расчета амплитуд по (2) и (4) основной и кроссполяризаций



² Для наглядности размах кроссполяризационных зависимостей увеличен в шесть раз.

в месте нахождения объекта, на основании измеренных данных, для пяти различных объектов: 1 – человека в повседневной одежде; 2 – диэлектрические образцы (соль, воск, фторопласт); 3 – имитатор с малым количеством металлических поражающих элементов; 4 – имитатор со значительным количеством поражающих элементов; 5 – пистолет. Измерения для каждого объекта находятся внутри соответствующего эллипса. Как следует из этого рисунка, деполяризация электромагнитного излучения металлическими объектами сложной формы (поражающими элементами и пи-

столетом) проявляется в большей степени ($A_{кр}/A_{осн} > 1/6$), чем деполяризация от тела человека или диэлектрических объектов на нем.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения эффекта деполяризации в ММДС тела человека с целью обнаружения металлических предметов на нем. Также могут быть разработаны алгоритмы для задач классификации и анализа, которые позволят обнаруживать скрытые металлические объекты на теле человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов С. Н., Воробьев С. И., Дудкин В. И. Методика построения микроволнового изображения объекта с применением решения обратной задачи дифракции // Научн.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2014. Вып. 2(194). С. 69–74.
2. Kapilevich B. Y., Harmer S. W., Bowring N. J. Non-imaging microwave and millimetre-wave sensors for concealed object detection. New York: CRC press reference, 2014. 232 p.
3. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Сов. радио, 1962. 244 с.
4. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн: в 3 кн. Кн. 2: Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 640 с.

5. Зверев В. А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975. 304 с.

6. A comparison of ultra wide band conventional and direct detection radar for concealed human carried explosives detection / S. W. Harmer, N. J. Bowring, N. D. Rezgui, D. Andrews // Progress in electromagnetics research letters. 2013. Vol. 39. P. 37–47.

7. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн: в 3 кн. Кн. 3: Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008. 688 с.

A. D. Grigoriev

Saint Petersburg Elrectrotechnical University "LETI"

V. V. Mesheryakov, S. N. Semenov

APSTEC Labs Co. (Saint Petersburg)

Investigation of polarization changing effect by hidden objects placed on a human body

Possibility of identification of the hidden metal objects on a human's body based on changing of the reflected wave polarization sharp edges and vertexes of the object is considered. The matrix equation for the main and cross-polarizations amplitudes is formulated. Results of measurements are given in special installation. It is shown that amplitude of cross-polarization of the reflected signal can serve for indication of the hidden metal objects.

Microwaves, depolarization effect, inspection systems

Статья поступила в редакцию 31 июля 2015 г.